

EP03786345.3  
FB15674

Abstract of DE 198 02 613 A1

A method for operating a refrigeration circuit and a refrigeration plant for executing said method is disclosed, wherein the energy being released during the expansion of process air is used at least partially for compression of the process air. The compression and expansion of the process air takes place preferably in a pressure-wave machine, to which a turbo compressor for compensation of energy losses is assigned.



①⑨ **BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**



**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

⑫ **Offenlegungsschrift**  
⑩ **DE 198 02 613 A 1**

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**F 25 B 9/02**  
F 02 G 5/02  
B 60 H 1/32  
B 61 D 27/00

⑳ Aktenzeichen: 198 02 613.7  
㉔ Anmeldetag: 23. 1. 98  
㉕ Offenlegungstag: 29. 7. 99

**DE 198 02 613 A 1**

⑦① Anmelder:  
FKW HANNOVER Forschungszentrum für  
Kältetechnik und Wärmepumpen GmbH, 30419  
Hannover, DE

⑦④ Vertreter:  
WINTER, BRANDL, FÜRNISS, HÜBNER, RÖSS,  
KAISER, POLTE, Partnerschaft, 85354 Freising

⑦② Erfinder:  
Kruse, Horst, Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c., 30419 Hannover,  
DE

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤④ Kälteanlage

⑤⑦ Offenbart ist ein Verfahren zum Betreiben eines Kälte-  
mittelkreislaufes und eine Kälteanlage zur Durchführung  
eines derartigen Verfahrens, bei denen die bei der Expan-  
sion der Prozeßluft frei werdende Energie zumindest teil-  
weise zur Verdichtung der Prozeßluft ausgenutzt wird. Die  
Verdichtung und Expansion der Prozeßluft erfolgt vor-  
zugsweise in einer Druckwellenmaschine, der zum Aus-  
gleich der Energieverluste ein Turboverdichter zugeord-  
net ist.

**DE 198 02 613 A 1**

Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Betreiben eines Kältemittelkreislaufes gemäß dem Oberbegriff des Patentanspruchs 1 und eine Kälteanlage gemäß dem Oberbegriff des nebengeordneten Patentanspruchs 7.

Derartige Verfahren und Kälteanlagen werden beispielsweise zur Kühlung und Klimatisierung von Straßen- und Schienenfahrzeugen mit verbrennungsmotorischem Antrieb eingesetzt.

Neben den bekannten Kältemitteln, wie beispielsweise Kohlenwasserstoffverbindungen (Frigen) Kältsolen (NaCl-Lösungen) etc., wird auch Luft eingesetzt, so daß der für derartige Kaltluftkälteanlagen gültige thermodynamische Vergleichsprozess der ideale Joule-Prozeß ist. Ein derartiger idealer Joule-Prozeß ist in Fig. 1, auf die bereits an dieser Stelle hingewiesen sei, in einem T, s-Diagramm (Temperatur, Entropie-Diagramm) dargestellt. Der Joule-Prozeß ist gekennzeichnet durch eine Verdichtung mit konstanter Entropie (isentropische Verdichtung) (1→2), eine Wärmeabgabe bei konstantem Druck (isobare Wärmeabgabe) (2→3), eine isentrope Entspannung (3→4) und eine isobare Wärmaufnahme (4→1). Das heißt, nach Ende der isobaren Wärmaufnahme entlang der Linie konstanten Druckes  $p_1$  ist der Ausgangszustand 1 wieder erreicht.

Ein derartiger idealer Joule-Kreisprozeß läßt sich theoretisch mit einer Kaltluftkälteanlage verwirklichen, wie sie in Fig. 2 stark vereinfacht dargestellt ist. Die im Zustand 1 (siehe Fig. 1) aus einem zu kühlenden Raum 1 (gestrichelt in Fig. 2) angesaugte Luft wird mittels eines Verdichters 2 isentrop verdichtet, wobei die zur Verdichtung erforderliche Energie von einem Elektromotor 4 oder von den Abgasen des Verbrennungsmotors geliefert werden kann. Die auf den Zustand 2 (Fig. 1) verdichtete und erwärmte Luft wird über einen umgebungsseitigen Wärmetauscher 6 entlang einer isobaren durch Wärmeaustausch mit der Umgebung abgekühlt und dem Eingang einer Expansionsmaschine 8 zugeführt. In dieser erfolgt eine isentrope Entspannung vom Zustand 3 zum Zustand 4, wobei die Luft auf ihre Kühlttemperatur abgekühlt wird. Diese Kaltluft wird einem im zu kühlenden Raum 1 angeordneten kühlraumseitigen Wärmetauscher 10 zugeführt, über den die Luft im zu kühlenden Raum 1 auf die gewünschte Temperatur abgekühlt wird. Dabei steigt entsprechend die Temperatur der Prozeßluft in der Kälteanlage entlang der Isobaren  $p_1$  vom Zustand 4 zum Ausgangszustand 1 an. Der Kältekreislauf kann nun von vorne beginnen.

Wie im folgenden noch näher ausgeführt werden wird, lassen sich derartige Kreisprozesse als geschlossene oder offene Überdruckprozesse realisieren, wobei bei geschlossenen Prozessen ein innerer Wärmetauscher verwendet wird, während dieser bei offenen Prozessen auf der Kühlseite nicht benötigt wird. Die offenen Prozesse sind energetisch günstiger als geschlossene Prozesse, da die Wärmetauscherverluste auf der Kühlseite des Kreislaufes entfallen.

Anstelle der in Fig. 2 dargestellten einstufigen Verdichtung kann beispielsweise auch eine zweistufige Verdichtung mit oder ohne Zwischenkühlung vorgesehen werden. Prinzipiell einsetzbar sind auch beidseitig offene Prozesse, bei denen die zu verdichtende Luft aus der Umgebung angesaugt wird. Die Abkühlung der der Expansionsmaschine zugeführten Luft erfolgt über Kaltluft, die dem zu kühlenden Raum entzogen wird. Ein derartiger beidseitig offener Prozeß läßt sich auch mit zweistufiger Verdichtung mit und ohne Zwischenkühlung darstellen.

Neben den vorgenannten Überdruckprozessen lassen sich noch Unterdruckprozesse realisieren, bei denen Luft aus der Umgebung angesaugt und die erzeugte Kälte über einen inneren Wärmetauscher an den zu kühlenden Raum abgegeben wird.

Eine Kennziffer für einen derartigen idealen Joule-Prozeß ist die theoretische Kälteleistungszahl  $\epsilon$ . Ein derartiger idealer Kreisprozeß hat einen isentropen Wirkungsgrad von  $\eta=1.0$ , während nicht ideale Joule-Prozesse isentrope Wirkungsgrade für die Verdichtung oder Expansion  $\eta<1$  haben. Die maximal mögliche Kälteleistungszahl  $\epsilon$  nimmt mit abnehmendem isentropen Wirkungsgrad ab. Der Kaltluftprozeß kann erheblich verbessert werden, wenn sich ein hoher isentroper Wirkungsgrad  $\eta$  realisieren läßt.

Demzufolge liegt der Erfindung die Aufgabe zugrunde, ein Verfahren zum Betreiben eines Kältemittelkreislaufes und eine Kälteanlage zur Durchführung eines derartigen Verfahrens zu schaffen, bei denen der isentrope Wirkungsgrad gegenüber herkömmlichen Lösungen verbessert ist.

Diese Aufgabe wird hinsichtlich des Verfahrens durch die Merkmale des Patentanspruchs 1 und hinsichtlich der Kälteanlage durch die Merkmale des Patentanspruchs 7 gelöst.

Durch die Maßnahme, einen Teil der bei der Expansion (beispielsweise von Luft) freiwerdenden Energie zur Verdichtung des Kältemittels nach der Wärmeabgabe an den zu kühlenden Raum zu verwenden, kann der isentrope Wirkungsgrad wesentlich angehoben werden, so daß gegenüber herkömmlichen Lösungen höhere Kälteleistungszahlen erzielbar sind.

Ganz besonders vorteilhaft ist es, wenn die energetische Verbindung der Expansionseinrichtung und der Verdichtungseinrichtung durch die Verwendung einer Druckwellenmaschine erfolgt, die praktisch als Kraft- und Arbeitsmaschine wirkt. Eine derartige Druckwellenmaschine vereint in sich die Funktion eines Verdichters und einer Expansionsmaschine.

Die Druckwellenmaschine wird vorteilhafterweise in Kombination mit einem zusätzlichen Verdichter betrieben, da die im Expansionsteil der Druckwellenmaschine gewonnene Arbeit nicht ausreicht, um die für die Verdichtung erforderliche Arbeit abzudecken. Dabei wird es besonders bevorzugt, wenn dieser Verdichter als Turboverdichter ausgeführt ist, der parallel oder in Reihe zur Verdichtungsseite der Druckwellenmaschine geschaltet ist.

Ein derartiger Verdichter, beispielsweise der Turboverdichter kann durch einen eigenen Elektromotor und/oder – bei Verbrennungsmotoren – durch eine von den Verbrennungsgasen angetriebene Gasexpansionsturbine angetrieben werden. Falls genügend Abgasenergie zur Verfügung steht, kann der Elektromotor derart ausgelegt werden, daß er auch als Generator eingesetzt werden kann.

Die Kühlleistung der Kälteanlage läßt sich weiter verbessern, wenn Druckwellenmaschine und Verdichter in Reihe angeordnet sind und zwischen diesen ein Zwischenkühler geschaltet wird.

Eine weitere Verbesserung des Prozesses kann durch einen inneren Wärmeaustausch zwischen den der Expansionsseite und der Verdichtungsseite zugeführten Kältemittelsströmen erfolgen.

Je nach Prozeßführung kann ein äußerer Wärmetauscher zum Abkühlen des verdichteten Kältemittels und/oder ein in-

nerer Wärmetauscher zum Abkühlen der Luft im zu kühlenden Raum vorgesehen werden.

Prinzipiell läßt sich der erfindungsgemäße Prozeß als geschlossener, offener, als Überdruck- oder Unterdruckprozeß betreiben, so daß praktisch die gleichen Schaltungsvarianten wie bei den bekannten Kaltluftkälteanlagen realisierbar sind.

Sonstige vorteilhafte Weiterbildungen der Erfindung sind Gegenstand der weiteren Unteransprüche.

Im folgenden werden bevorzugte Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand schematischer Zeichnungen näher erläutert.

Es zeigen:

Fig. 1 ein Temperatur-Entropie-Diagramm eines idealen Joule-Prozesses;

Fig. 2 eine Kälteanlage für einen derartigen idealen Joule-Prozeß mit einstufiger Verdichtung;

Fig. 3 ein Kreislaukschema einer erfindungsgemäßen Kaltluftkälteanlage mit einstufiger Verdichtung;

Fig. 4 Kälteleistungszahlen in Abhängigkeit vom Druckverhältnis und vom isentropen Wirkungsgrad;

Fig. 5 eine dreidimensionale Darstellung einer Druckwellenmaschine;

Fig. 6a, 6b geschlossene bzw. offene Überdruckprozesse mit einstufiger Verdichtung;

Fig. 7a, 7b geschlossene bzw. offene Überdruckprozesse mit Zwischenkühlung;

Fig. 8a, 8b geschlossene bzw. offene Überdruckprozesse mit innerer Kühlung;

Fig. 9a, 9b geschlossene bzw. offene Überdruckprozesse mit Zwischenkühlung und innerer Kühlung;

Fig. 10, 11 beidseitig offene Prozesse ohne bzw. mit Zwischenkühlung;

Fig. 12 einen dem Überdruckprozeß aus Fig. 6a entsprechenden Unterdruckprozeß;

Fig. 13 einen Unterdruckprozeß mit innerer Kühlung;

Fig. 14 einen Unterdruckprozeß mit Zwischenkühlung und

Fig. 15 einen Unterdruckprozeß mit Zwischenkühlung und innerer Kühlung.

Fig. 3 zeigt ein stark vereinfachtes Ausführungsbeispiel eines Kreislaukschemas für eine erfindungsgemäße Kaltluftkälteanlage, bei der die Verdichterseite 14 einer Druckwellenmaschine 12 parallel zu einem Turboverdichter 2 geschaltet ist. Im folgenden werden für einander entsprechende Bauelemente die gleichen Bezugszeichen verwendet, wie sie bereits im Zusammenhang mit der Beschreibung und den Fig. 1 und 2 verwendet wurden.

Die Luft wird aus dem zu kühlenden Raum 1 abgesaugt und in zwei Teilströme aufgeteilt, wobei ein Kältemittelteilstrom zum Turboverdichter 2 geführt ist, während der andere Kältemittelteilstrom mit der Verdichterseite 14 der Druckwellenmaschine 12 verbunden ist. Die beiden Kältemittelteilströme werden im Turboverdichter 2 und in der Verdichterseite 14 der Druckwellenmaschine 12 verdichtet, wobei bei realen Kreisprozessen diese Verdichtung nicht isentrop sondern mit einem isentropen Wirkungsgrad  $\eta$  (Verdichter, Druckwellenmaschine)  $< 1$  erfolgt, der aufgrund der Zusammenschaltung der Druckwellenmaschine mit dem Turboverdichter höher ist als bei bisher bekannten Verdichtungseinrichtungen.

Die beiden auf den Druck  $p_2$  verdichteten und auf die maximale Prozeßtemperatur erwärmten Kältemittelteilströme werden zusammengeführt und in einem äußeren umgebungsseitigen Wärmetauscher, im folgenden Wärmetauscher 6 genannt, durch Wärmeaustausch mit der Umgebungsluft abgekühlt. Beim realen Kreisprozeß erfolgt auch diese Abkühlung im äußeren Wärmetauscher 6 nicht entlang einer Isobaren, da die Durchströmung des Wärmetauschers mit Wärmetauscherverlusten verbunden ist. Der abgekühlte, verdichtete Kaltluftstrom wird dann der Expansionsseite 16 (Hochdruck) der Druckwellenmaschine 12 zugeführt und dort mit dem für die Expansion kennzeichnenden Wirkungsgrad  $\eta < 1$  entspannt. Durch diese Expansion kühlt sich die Luft etwa wie in Fig. 1 dargestellt, auf die niedrigste Prozeßtemperatur ab. Derart abgekühlte Luft wird einem kühlraumseitigen inneren Wärmetauscher, im folgenden Wärmetauscher 10 genannt, zugeführt, der in dem zu kühlenden Raum 1 angeordnet ist. In diesem Kühlraum 1 befindliche Luft wird durch Wärmeaustausch mit der in den inneren Wärmetauscher 10 eintretenden Prozeßluft abgekühlt, während diese auf die Ausgangstemperatur (Zustand 1 in Fig. 1) erwärmt wird. Die aus dem inneren Wärmetauscher 10 aus tretende Kaltluft wird dann wieder aus dem zu kühlenden Raum 1 abgesaugt und der Verdichterseite 14 der Druckwellenmaschine 12 sowie dem Turboverdichter 2 zugeführt – der Kälteprozeß beginnt wieder von vorne.

Der äußere und/oder der innere Wärmetauscher 6 bzw. 10 können wahlweise im Gegenstrom oder im Kreuzstrom mit der Umgebungsluft oder mit der im zu kühlenden Raum 1 vorhandenen Luft geführt werden.

Die Kälteleistungszahl  $\epsilon$  für einen derartigen Prozeß mit energetischer Kopplung zwischen Expansions- und Verdichtungseinrichtung berechnet sich nach der Gleichung (1):

$$\epsilon_{K,J} = \frac{1}{(p_2 / p_1)^{\frac{\kappa-1}{\kappa}} - 1} \quad (1)$$

wobei  $p_2$ ,  $p_1$  die Isobaren im T, s-Diagramm und  $\kappa$  der Isentropen-Exponent sind. Für einen nicht idealen Prozeß, das heißt für einen Prozeß, bei dem die Zustandsänderung von 1 nach 2 bzw. von 3 nach 4 nicht entlang einer Vertikalen im T, s-Diagramm sondern entlang einer geneigten Linie erfolgt ergibt sich eine maximale Kälteleistungszahl in Abhängigkeit von einem bestimmten Druckverhältnis ( $p_2/p_1$ ). Bei derartigen nicht-idealen Prozessen ist somit der isentrope Wirkungsgrad  $< 1$ .

Fig. 4 zeigt Kälteleistungszahlen von Joule-Prozessen mit Energiekopplung zwischen Verdichtungs- und Expansions- teil in Abhängigkeit vom isentropen Wirkungsgrad  $\eta$ . Es wird deutlich, daß sich die Kälteleistungszahl an diejenige des Idealprozesses annähern läßt, wenn sich durch geeignete Anlagenkonzeption ein isentroper Wirkungsgrad  $\eta$  realisieren läßt.

Die Verwendung eines zusätzlichen Verdichters 2 ist aus den eingangs genannten Gründen erforderlich. Beim gezeigten Ausführungsbeispiel wird ein Turboverdichter 2 gewählt, prinzipiell könnten jedoch auch andere Verdichterbauarten eingesetzt werden. Turboverdichter zeichnen sich allerdings durch einen hohen isentropen Wirkungsgrad aus, so daß die

Kälteleistung in Verbindung mit der eingesetzten Druckwellenmaschine einen Maximalwert annimmt.

Für den Fall, daß die Kaltluftkälteanlage zur Klimatisierung eines Kraftfahrzeugs oder eines Schienenfahrzeugs mit Verbrennungsmotor eingesetzt wird, kann der Turboverdichter 2 unter Ausnutzung des freiwerdenden Abgas es durch eine Abgasexpansionsturbine 20 bekannter Bauart angetrieben werden. Für die Kaltlaufphase des Verbrennungsmotors oder für Betriebszustände des Verbrennungsmotors, in denen nicht genug Abgasenergie zum Antrieb der Abgasexpansionsturbine 20 zur Verfügung steht, erfolgt der Antrieb des Turboverdichters 2 durch einen Elektromotor 18, so daß die Verdichtung unabhängig von der nutzbaren Abgasenergie erfolgen kann.

In einem bevorzugten Ausführungsbeispiel soll dieser Elektromotor 18 im Fahrbetrieb – das heißt bei ausreichender Abgasenergie – als Generator eingesetzt werden, der durch die Abgasexpansionsturbine 20 angetrieben wird.

Turboverdichter, auch Kreiselverdichter oder Turbokompressoren genannt, arbeiten nach dem dynamischen Prinzip, das heißt, sie erzeugen einen statischen Druck durch Umwandlung von kinetischer Energie in statische Druckenergie. Als energieübertragendes Element werden Laufräder eingesetzt, die mit hoher Drehzahl rotieren. Je nach Laufradform unterscheidet man dabei Radialverdichter und Axialradverdichter. Wie bereits erwähnt zeichnen sich derartige Turboverdichter 2 durch einen hohen isentropen Wirkungsgrad aus, so daß in Kombination mit der Druckwellenmaschine 14 hohe Kälteleistungszahlen realisierbar sind.

Hinsichtlich konstruktiver Details von Turboverdichtern 2 und Abgas-Expansionsturbinen 20 sei der Einfachheit halber auf die zahlreich vorhandene Fachliteratur verwiesen.

Die bei dem erfindungsgemäßen Kaltluftprozeß eingesetzte Druckwellenmaschine ist im Prinzip ein Zellenradverdichter, der in den USA unter dem Namen "Comiprex" bekannt ist. Während man normalerweise zur Verdichtung eines gasförmigen Mediums einen Verdichter und eine Antriebsmaschine benötigt, wird in der Druckwellenmaschine (Zellenradverdichter) die Energie direkt von einem gasförmigen Medium an ein anderes gasförmiges Medium übertragen. Es handelt sich somit um die Vereinigung einer Kraft- und Arbeitsmaschine in einer einzigen Maschine. Prinzipiell können Druckwellenmaschinen mit drei Betriebsarten betrieben werden:

- a) ein Medium wird entspannt und verdichtet dadurch ein zweites Medium (diese Prozeßführung wird im vorliegenden Kaltluftprozeß eingesetzt);
- b) eine Medium von mittleren Druck wird in zwei Ströme unterteilt, von denen der eine auf einen höheren und der andere auf einen tieferen Druck gebracht wird und
- c) zwei Paßströme, von der eine einen höheren und der andere einen tieferen Druck haben werden auf ein mittleres Druckniveau gebracht.

Wie aus der stark vereinfachten räumlichen Darstellung gemäß Fig. 5 entnehmbar ist, hat eine derartige Druckwellenmaschine 12 ein Zellenrad 22, das drehbar in einem Gehäuse 24 gelagert ist. Das Gehäuse 24 hat an der Verdichterseite 14 und der Expansionsseite 16 jeweils einen Eintritt 26 bzw. 28 und einen Austritt 30 bzw. 32 zur Zu- und Abführung der zu verdichtenden bzw. zu expandierenden Kaltluft.

Die durch das Zellenrad 22 gebildeten, sich in Axialrichtung erstreckenden Zellen 23 können mit geraden oder gekrümmten Wandungen ausgeführt werden, wobei bei geraden Zellen 23 in der Regel ein äußerer Antrieb benötigt wird, während bei gekrümmten Zellwandungen (Schaufeln) die Drehung durch Ablenkung der Kaltluftströmung bewerkstelligt wird. Der gegebenenfalls erforderliche Antrieb des Zellenrades 22 ist in Fig. 5 mit dem Bezugszeichen 34 angedeutet.

Während der Drehung des Zellenrades 22 kommen die in Axialrichtung verlaufenden Zellen 23 an Öffnungen vorbei, die mit den Eintritts- und Austrittsstutzen 26 bis 32 verbunden sind. Diese Öffnungen im Gehäuse 24 müssen derart angeordnet sein, daß sie in Abhängigkeit von der Zellenlänge (Axiallänge) und der Drehzahl des Zellenrades 22 den gasdynamischen Vorgängen folgen. Das heißt, die Verdichtungs- und Verdünnungswellen (Druck-/Saugwellen) müssen im richtigen Takt auf die Öffnungen bzw. Wandungen des Gehäuses 24 treffen. Dabei wird am expansionsseitigen Eintritt 28 eine Druckwelle in die jeweilige Zelle eingeleitet, die zu einer Verdichtung der durch den verdichterseitigen Eintritt 26 eintretenden Luft führt, die durch den verdichterseitigen Austritt 30 die Druckwellenmaschine 12 verläßt. Durch den expansionsseitigen Austritt (Niederdruck) wird eine Saugwelle (Verdünnungswelle) in die jeweilige Zelle eingeleitet, welche die Expansion der durch den Eintritt 28 zugeführten Luft bewirkt. Die entstehenden Verdichtungs- und Verdünnungswellen (Druckwellen, Saugwellen) unterstützen sich gegenseitig im richtigen Takt, so daß sich im stationären Zustand die gewünschten Druckverhältnisse einstellen. Die einzelnen Zellen 23 werden abwechselnd von vergleichsweise kühler Luft (expansionsseitig) und erwärmter Luft (verdichterseitig) durchströmt, so daß die Wände der Zellen selbst eine mittlere Temperatur annehmen, die zwischen den beiden vorgenannten Temperaturen liegt. Der Einfachheit halber sei hinsichtlich weiterer Details ebenfalls auf die vorliegende Fachliteratur zum Comiprex-Verfahren verwiesen. Derartige Druckwellenmaschinen werden zur Aufladung bei kleinen, stationären Dieselmotoren oder bei Fahrzeugmotoren eingesetzt.

In Fig. 6a ist das Kreislaufschema der Kälteanlage aus Fig. 3 nochmals in etwas abgewandelter Form dargestellt. Daraus geht hervor, daß der Prozeßluft im inneren Wärmetauscher 10 eine Wärmemenge  $\dot{Q}_0$  zugeführt wird, während der Prozeßluft im äußeren Wärmetauscher 6 durch Wechselwirkung mit der Umgebungsluft ein Wärmestrom  $\dot{Q}_{ab}$  entzogen wird.

Bei dem in Fig. 3, 6a dargestellten Prozeß handelt es sich um einen sog. geschlossenen Prozeß, bei dem ein innerer Wärmetauscher 10 auf der Kühlseite, d. h. zur Abkühlung des Kühlraumes 1 benötigt wird.

Aus energetischen Gesichtspunkten kann es allerdings vorteilhaft sein, wenn zur Vermeidung der Wärmetauscherverluste auf der Kühlseite der innere Wärmetauscher 10 entfällt und die Prozeßluft direkt dem geschlossenen Kühlraum 1 zugeführt bzw. aus diesem abgesaugt wird. Ein derartiger offener Prozeß, bei dem kein innerer Wärmetauscher 10 verwendet wird, ist in Fig. 6b dargestellt.

Während bei den vorbeschriebenen Ausführungsbeispielen Teilströme der Prozeßluft in der Druckwellenmaschine 12 und im Turboverdichter 2 verdichtet wurden und diese beiden Teilströme nach Vereinigung und Abkühlung der Expan-

sionsseite der Druckwellenmaschine zugeführt wurden, können der Turboverdichter 2 und die Verdichterseite 14 der Druckwellenmaschine auch hintereinander geschaltet werden. Zur Verbesserung der Kälteleistungszahl ist es bei einer derartigen Schaltung, die in den Fig. 7a, 7b dargestellt ist, vorteilhaft, wenn zwischen den Turboverdichter 2 und die Expansionsseite der Druckwellenmaschine 12 ein Zwischenkühler 34 geschaltet wird. Durch einen derartigen Zwischenkühler 34 wird die Prozeßluft nach der Verdichtung im Turboverdichter 2 durch Wärmeaustausch mit der Umgebung zwischengekühlt und somit mit niedrigerer Temperatur der Verdichterseite 14 der Druckwellenmaschine 12 zugeführt. Auch dieser Prozeß mit Zwischenkühler 34 zwischen den beiden Verdichtungsstufen im Turboverdichter 2 und in der Druckwellenmaschine 12 läßt sich als geschlossener Prozeß (in Fig. 7a) und offener Prozeß (in Fig. 7b) realisieren. Modellrechnungen zeigten, daß sich mit dem in Fig. 7b dargestellten Prozeß höhere Kälteleistungszahlen realisieren lassen als mit den sonstigen, vorbeschriebenen Prozessen.

Die Fig. 8a, 8b, 9a und 9b zeigen Kaltluftkälteanlagen, bei denen die aus dem Kühlraum 1 austretende Kaltluft durch einen inneren Wärmeaustausch mit der der Expansionsseite 16 der Druckwellenmaschine 12 zugeführten Prozeßluft erwärmt wird, so daß die Prozeßlufttemperatur am Eingang der Expansionsseite 16 der Druckwellenmaschine 12 entsprechend abgesenkt wird. Dieser innere Wärmeaustausch zwischen der Hochdruck-/Niederdruck-Prozeßluft erfolgt in einem Innenwärmetauscher 36, der im Gegen- oder im Kreuzstrom betrieben werden kann.

In den Fig. 8a, 8b sind Kaltluftkälteanlagen gezeigt, bei denen – ähnlich wie bei den Ausführungsbeispielen gemäß den Fig. 6a, 6b der Turboverdichter 2 parallel zur Verdichterseite 14 der Druckwellenmaschine 12 geschaltet ist. Die Prozesse können wiederum als geschlossener (Fig. 8a) oder offener (Fig. 8b) Prozeß ausgeführt werden.

Bei den in den Fig. 9a, 9b dargestellten Prozessen sind der Turboverdichter 2 und die Verdichterseite 14 der Druckwellenmaschine entsprechend den Schaltschemata in den Fig. 7a, 7b hintereinander geschaltet, so daß wiederum die Möglichkeit besteht, einen Zwischenkühler 34 einzusetzen, um die Prozeßluft nach der Verdichtung im Turboverdichter 2 durch Abzug des Wärmestroms  $Q_{zw}$  zwischenzukühlen. Selbstverständlich lassen sich auch diese Prozesse geschlossen (Fig. 9a) oder offen (Fig. 9b) realisieren. Die Kälteleistungszahl des in Fig. 9b dargestellten offenen Prozesses ist wiederum höher als diejenige der davor dargestellten Prozesse.

Während bei den in den Fig. 6b, 7b, 8b und 9b dargestellten Kälteanlagen einseitig offene Prozesse verwendet werden, d. h. Prozesse, bei denen die Prozeßluft aus dem Kühlraum 1 angesaugt und abgekühlt in diesen zurückgeführt wird, können alternativ auch sog. beidseitig offene Prozesse eingesetzt werden, bei denen die Prozeßluft aus der Umgebung angesaugt wird. Derartige Prozesse sind in den Fig. 10 und 11 dargestellt.

Bei dem in Fig. 10 gezeigten Kreislaufschema wird die Prozeßluft aus der Umgebung angesaugt und in zwei Teilströme unterteilt, von denen einer im Turboverdichter 2 und der andere durch die Druckwellenmaschine 12 verdichtet wird. Nach Zusammenführung der beiden Teilströme erfolgt eine Abkühlung der Prozeßluft in einem Wärmetauscher 40, wobei zur Abkühlung Luft aus dem Kühlraum 1 entnommen und dem Wärmetauscher 40 zugeführt wird. Nach der Abkühlung wird die Prozeßluft in der bereits bekannten Weise der Expansionsseite 16 der Druckwellenmaschine 12 zugeführt, dort entspannt und abgekühlt und dann in den Kühlraum 1 eingeleitet.

Bei dem in Fig. 11 dargestellten Ausführungsbeispiel wird die Prozeßluft ebenfalls aus der Umgebung angesaugt, wobei allerdings der Turboverdichter 2 und die Druckwellenmaschine 12 hintereinander geschaltet sind, so daß wiederum ein Zwischenkühler 34 zur Abkühlung der im Turboverdichter 2 verdichteten Prozeßluft eingesetzt werden kann. Die Abkühlung im Wärmetauscher 40 erfolgt analog zum vorbeschriebenen Ausführungsbeispiel.

Mit derartig beidseitig offenen Prozessen dürften sich optimale Kälteleistungszahlen realisieren lassen, die sehr nahe am idealen Joule-Prozeß angeordnet sind.

Bei den in den Fig. 3 bis 11 dargestellten Prozessen handelt es sich um sog. Überdruckprozesse, bei denen die Luft aus dem Kühlraum 1 oder aus der Umgebung angesaugt und nach der Entspannung wieder zum Kühlraum zurückgeführt wurde.

Prinzipiell lassen sich die in den Fig. 3 bis 9 gezeigten Prozesse auch als sog. Unterdruckprozesse realisieren, bei denen die Prozeßluft aus der Umgebung angesaugt und nach der Verdichtung auch wieder zur Umgebung zurückgeführt werden, während der Wärmeaustausch im Kühlraum 1 über einen inneren Wärmetauscher erfolgt.

Derartige Unterdruckprozesse sind in den Fig. 12 bis 15 dargestellt.

Bei dem in Fig. 12 gezeigten Kreislaufschema wird Prozeßluft aus der Umgebung entnommen und der Expansionsseite 16 der Druckwellenmaschine zugeführt und dort auf einen Unterdruck gebracht. Durch diese Entspannung wird die Prozeßluft abgekühlt und anschließend dem inneren Wärmetauscher 10 im Kühlraum 1 zugeführt, so daß letzterem zur Klimatisierung Wärme entzogen wird. Die erwärmte Prozeßluft wird dann in zwei Teilströme aufgeteilt und im Turboverdichter 2 bzw. in der Verdichterseite 14 der Druckwellenmaschine 12 verdichtet, so daß die Prozeßluft mit Umgebungsdruck an die Umgebung abgegeben werden kann.

Fig. 13 zeigt ein Kreislaufschema, bei dem durch Verwendung eines Innenwärmetauschers 36 die der Expansionsseite 16 der Druckwellenmaschine 12 zugeführte Prozeßluft abgekühlt und die aus dem Innenraum 1 angesaugte Prozeßluft vor der Verdichtung erwärmt wird.

Die Fig. 14 und 15 zeigen den Fig. 12 und 13 entsprechende Kälteanlagen, bei denen der Turboverdichter 2 und die Verdichterseite 14 der Druckwellenmaschine 12 hintereinander geschaltet sind, so daß ein Zwischenkühler 34 zur Zwischenkühlung der im Turboverdichter 2 verdichteten Prozeßluft verwendet werden kann. Fig. 15 zeigt dabei ein Kreislaufschema, bei dem entsprechend der Darstellung in Fig. 13 ein Innenwärmetauscher 36 zur Abkühlung der in die Expansionsseite 16 der Druckwellenmaschine 12 eintretenden Prozeßluft bzw. zur Erwärmung der in den Turboverdichter 2 eintretenden Prozeßluft eingesetzt wird.

Selbstverständlich sind noch weitere Varianten und Kombinationen der vorgenannten Schaltungen realisierbar, wobei beispielsweise auch eine mehrstufige Verdichtung durch hintereinander geschaltete, kleinere Turboverdichter vorstellbar ist. Wesentlich für die Erfindung ist, daß bei der Expansion der Prozeßluft freiwerdende Energie über die Druckwellenmaschine zur Verdichtung zumindest eines Teilstromes der Prozeßluft ausgenutzt wird, so daß der isentrope Wirkungsgrad der Anlage relativ nahe zum Wirkungsgrad eines idealen Kreisprozesses kommt.

Offenbart sind ein Verfahren zum Betreiben eines Kältemittelkreislaufes und eine Kälteanlage zur Durchführung eines

derartigen Verfahrens, bei denen die bei der Expansion der Prozeßluft freiwerdende Energie zumindest teilweise zur Verdichtung der Prozeßluft ausgenutzt wird. Die Verdichtung und Expansion der Prozeßluft erfolgt vorzugsweise in einer Druckwellenmaschine, der zum Ausgleich der Energieverluste ein Turboverdichter zugeordnet ist.

5

## Patentansprüche

1. Verfahren zum Betreiben eines Kältemittelkreislaufes mit den Schritten:

- Expandieren eines gasförmigen Kältemittels;
  - Erwärmen des expandierten und abgekühlten Kältemittels durch Wärmeaustausch mit einem zu kühlenden Medium;
  - Verdichten des gasförmigen Kältemittels,
- dadurch gekennzeichnet**, daß beim Expansionsschritt freiwerdende Energie zum Verdichten des Kältemittels genutzt wird.

10

2. Verfahren nach Patentanspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest ein Teil der Verdichtung in der Verdichterseite (14) und die Expansion in der Expansionsseite einer Druckwellenmaschine (12) erfolgt.

15

3. Verfahren nach Patentanspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Verdichtung zusätzlich in einem mechanischen Verdichter (2) erfolgt.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Patentansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Verdichter (2) durch das Abgas eines Verbrennungsmotors und/oder einen Elektromotor (18) betrieben wird.

20

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Patentansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß der Kältemittelkreislauf als geschlossener oder offener Überdruck- oder Unterdruckprozeß betrieben wird.

6. Verfahren nach Patentanspruch 5, dadurch gekennzeichnet, daß der Kreislauf mit innerem Wärmeaustausch zwischen expandiertem und verdichtetem Kältemittel betrieben wird.

25

7. Kälteanlage, insbesondere zur Durchführung des Verfahrens nach einem der vorhergehenden Patentansprüche, mit einer Verdichtungseinrichtung zum Verdichten eines gasförmigen Kältemittels, einer Expansionseinrichtung zum Entspannen des Kältemittels und einem zwischen Expansionseinrichtung und Verdichtungseinrichtung angeordneten Wärmetauscher, dadurch gekennzeichnet, daß die Verdichtungseinrichtung und die Expansionseinrichtung derart in Wirkverbindung stehen, daß bei der Expansion frei werdende Energie zum Verdichten des Kältemittels nutzbar ist.

30

8. Kälteanlage nach Patentanspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Expansionseinrichtung und die Verdichtungseinrichtung gemeinsam als Druckwellenmaschine (12) ausgebildet sind.

9. Kälteanlage nach Patentanspruch 8, dadurch gekennzeichnet, daß der Druckwellenmaschine (12) ein Verdichter (2) zum zusätzlichen Verdichten des Kältemittels zugeordnet ist.

35

10. Kälteanlage nach Patentanspruch 9, dadurch gekennzeichnet, daß der Verdichter ein Turboverdichter (2) ist, der durch einen Elektromotor (18) und/oder eine Gasexpansionsturbine (20) angetrieben ist.

11. Kälteanlage nach Patentanspruch 9 oder 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Druckwellenmaschine (12) und der Verdichter (2) in Reihe geschaltet und zwischen Druckwellenmaschine (12) und Verdichter (2) ein Zwischenkühler (34) angeordnet ist.

40

12. Kälteanlage nach einem der Patentansprüche 8 bis 11, gekennzeichnet durch einen Innenwärmetauscher (36) zum Abkühlen des in die Expansionsseite (16) der Druckwellenmaschine (12) eintretenden Kältemittelstroms durch Wärmeaustausch mit dem zu verdichtenden Kältemittelstrom.

13. Kälteanlagen nach einem der vorhergehenden Patentansprüche 7 bis 12, gekennzeichnet durch einen äußeren Wärmetauscher (6) zum Abkühlen des verdichteten Kältemittelstroms durch Wärmeaustausch mit der Umgebung.

45

14. Kälteanlage nach einem der vorhergehenden Patentansprüche 7 bis 13, gekennzeichnet durch einen inneren Wärmetauscher (10) zum Abkühlen eines Kühlraums (1) durch Wärmeaustausch mit dem expandierten Kältemittelstrom.

---

Hierzu 15 Seite(n) Zeichnungen

---

50

55

60

65

- Leerseite -



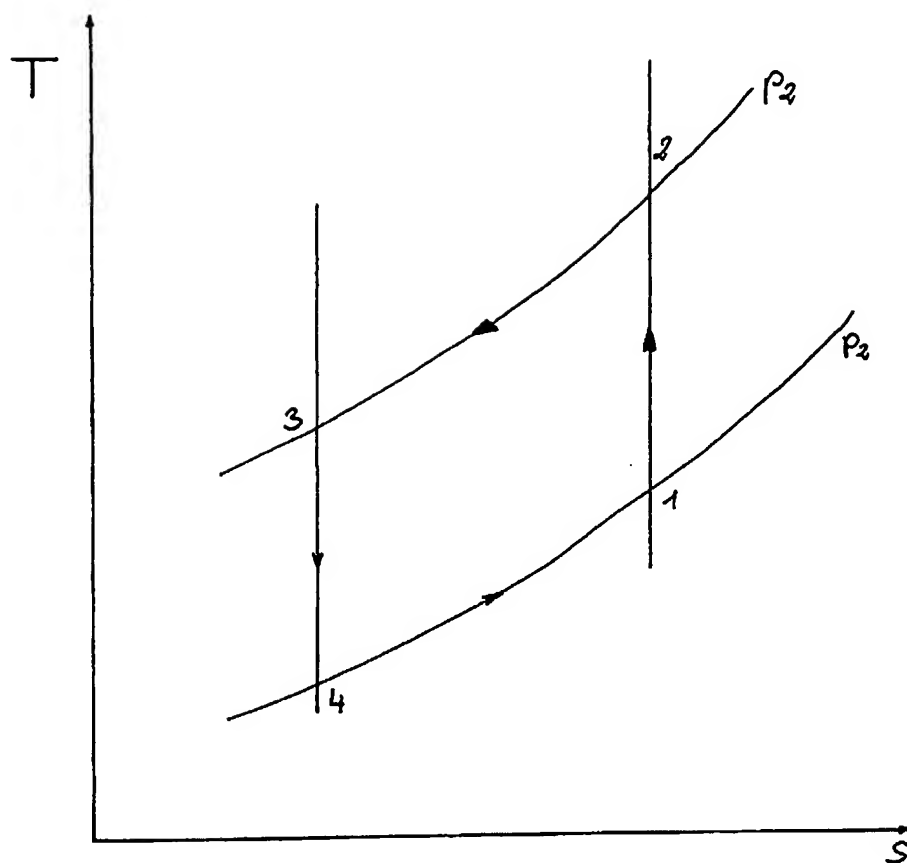


Fig. 1

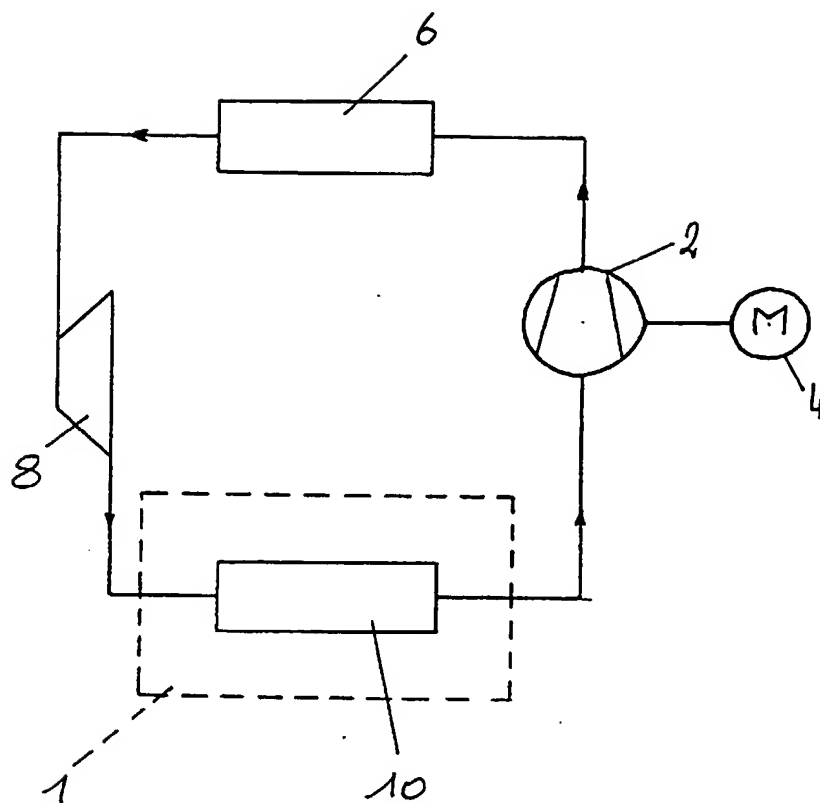


Fig. 2

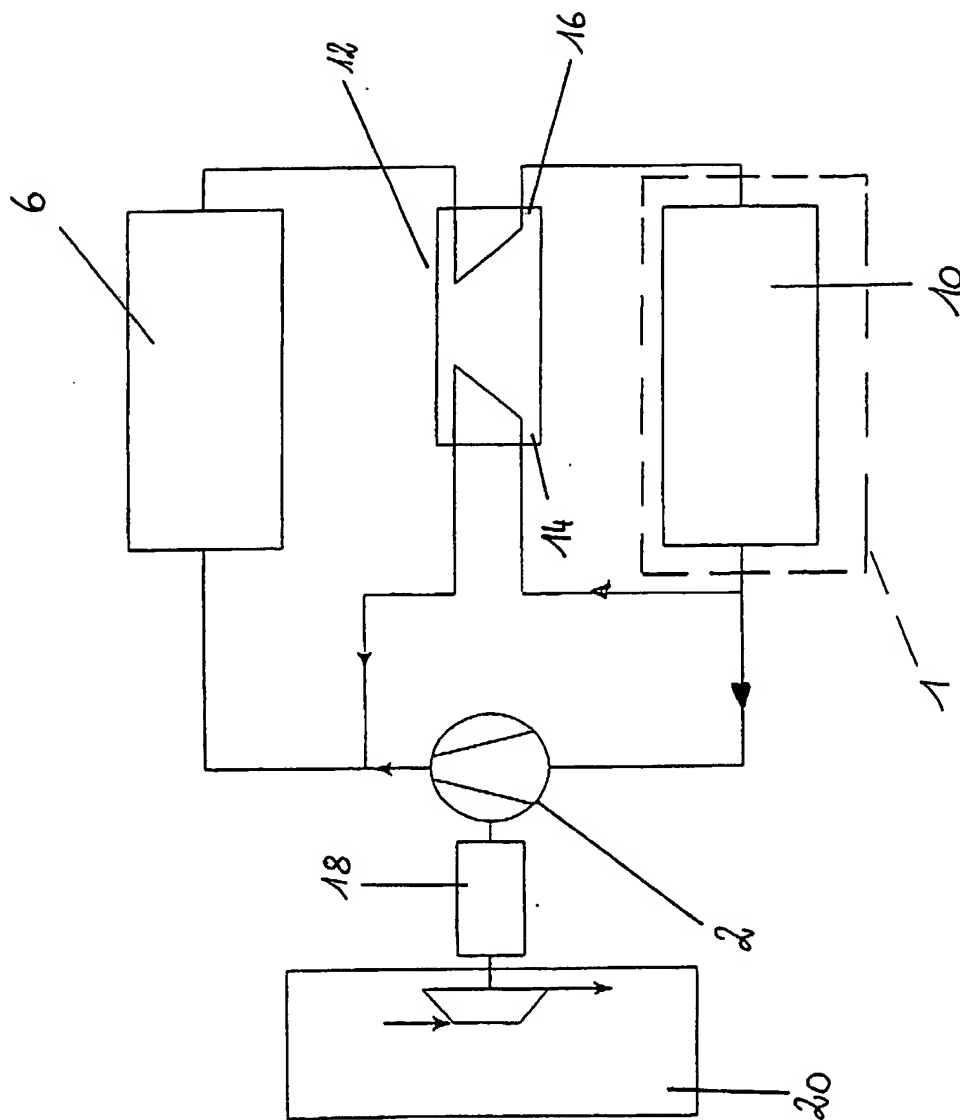


Fig. 3

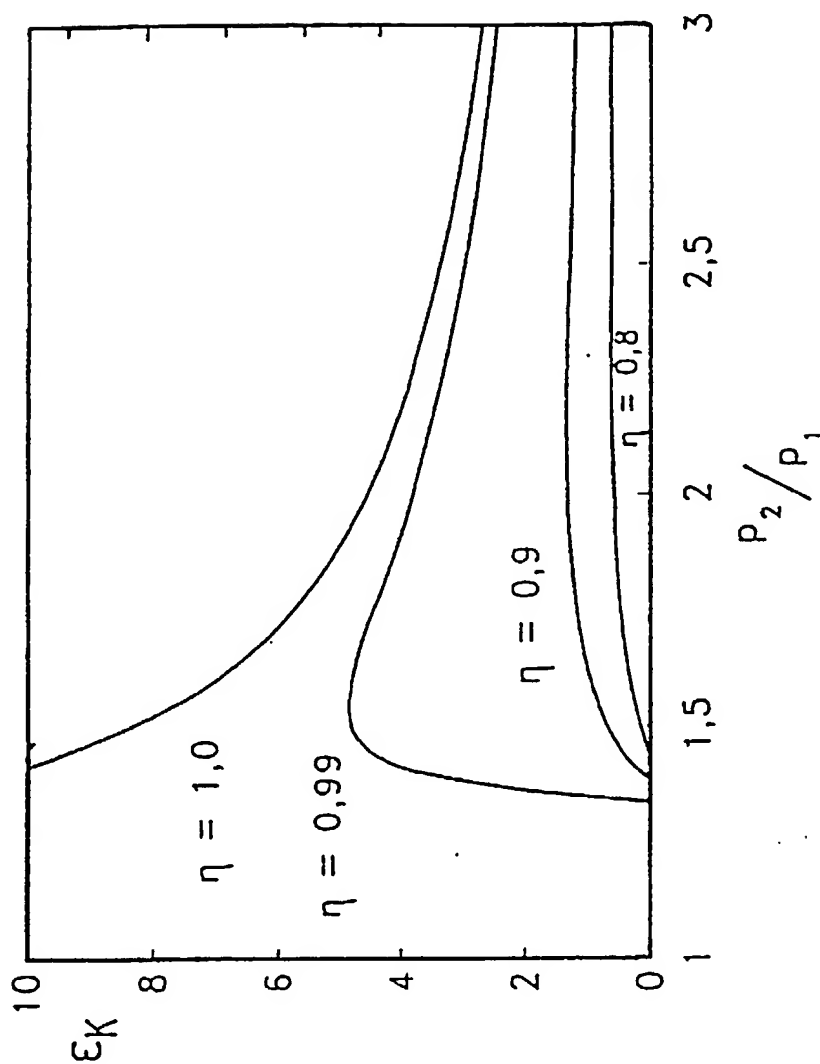


Fig. 4

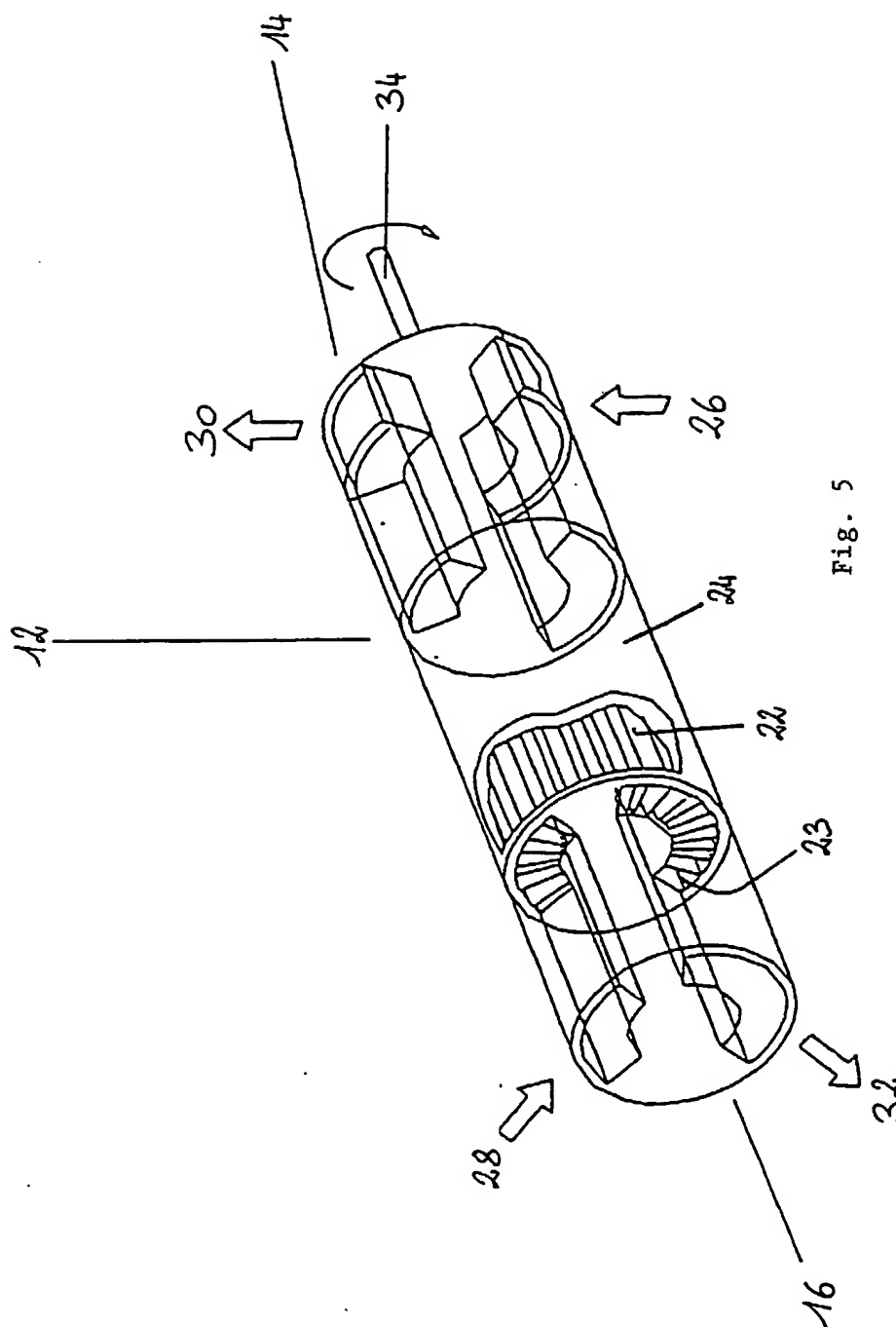


Fig. 5

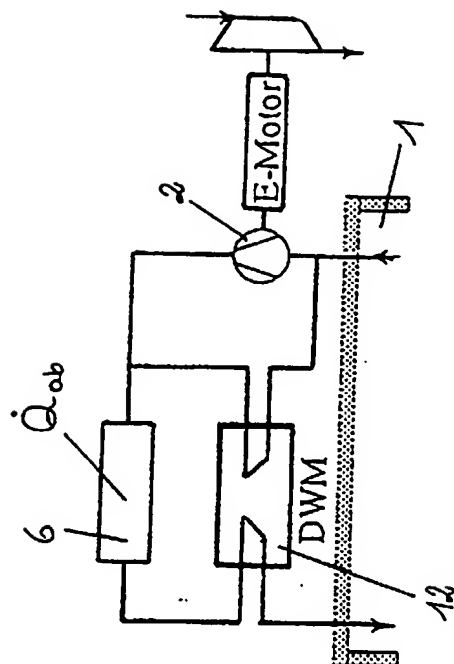


Fig. 6b

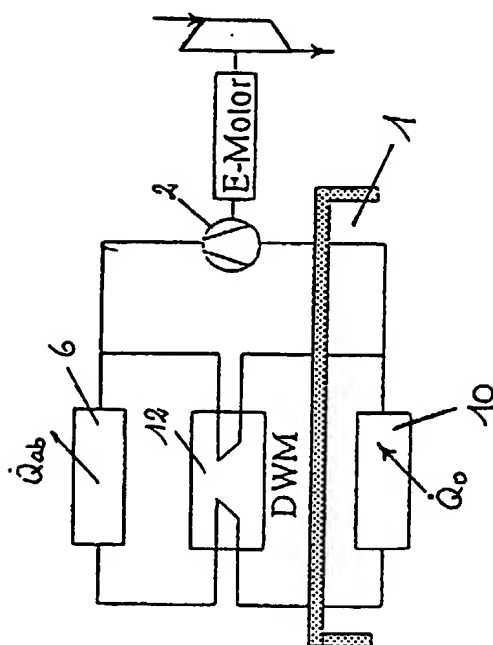


Fig. 6a

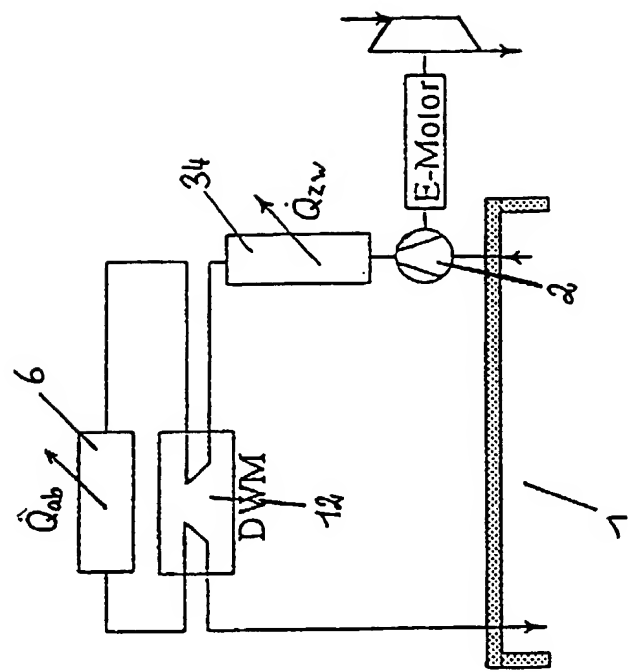


Fig. 7b

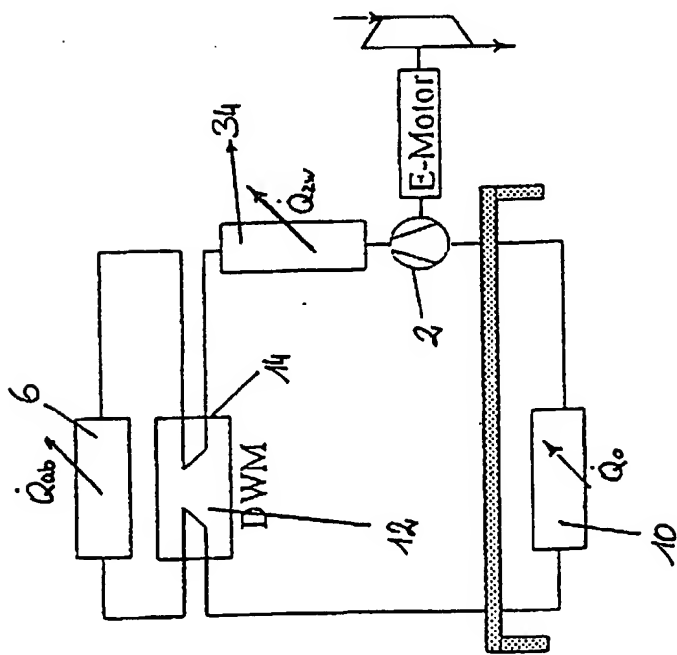


Fig. 7a

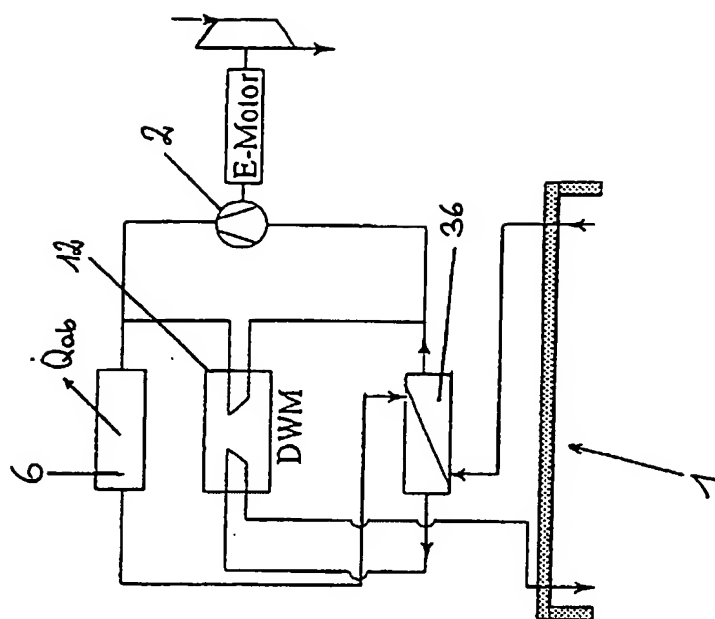


Fig. 8b

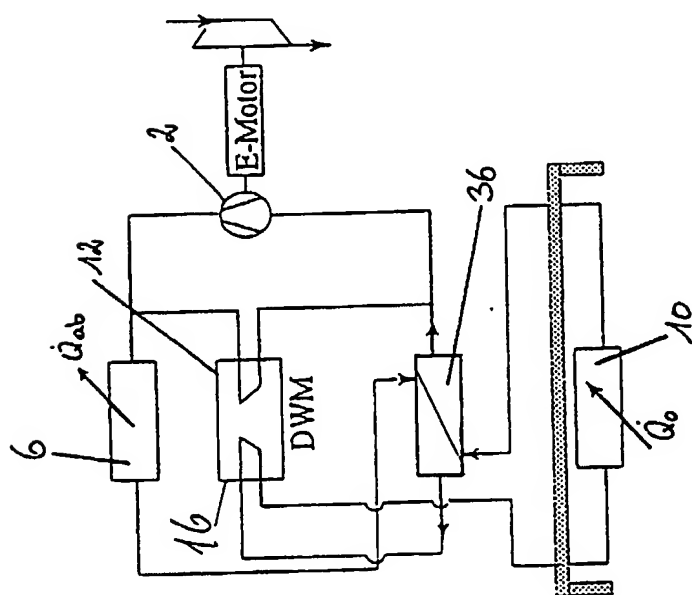


Fig. 8a



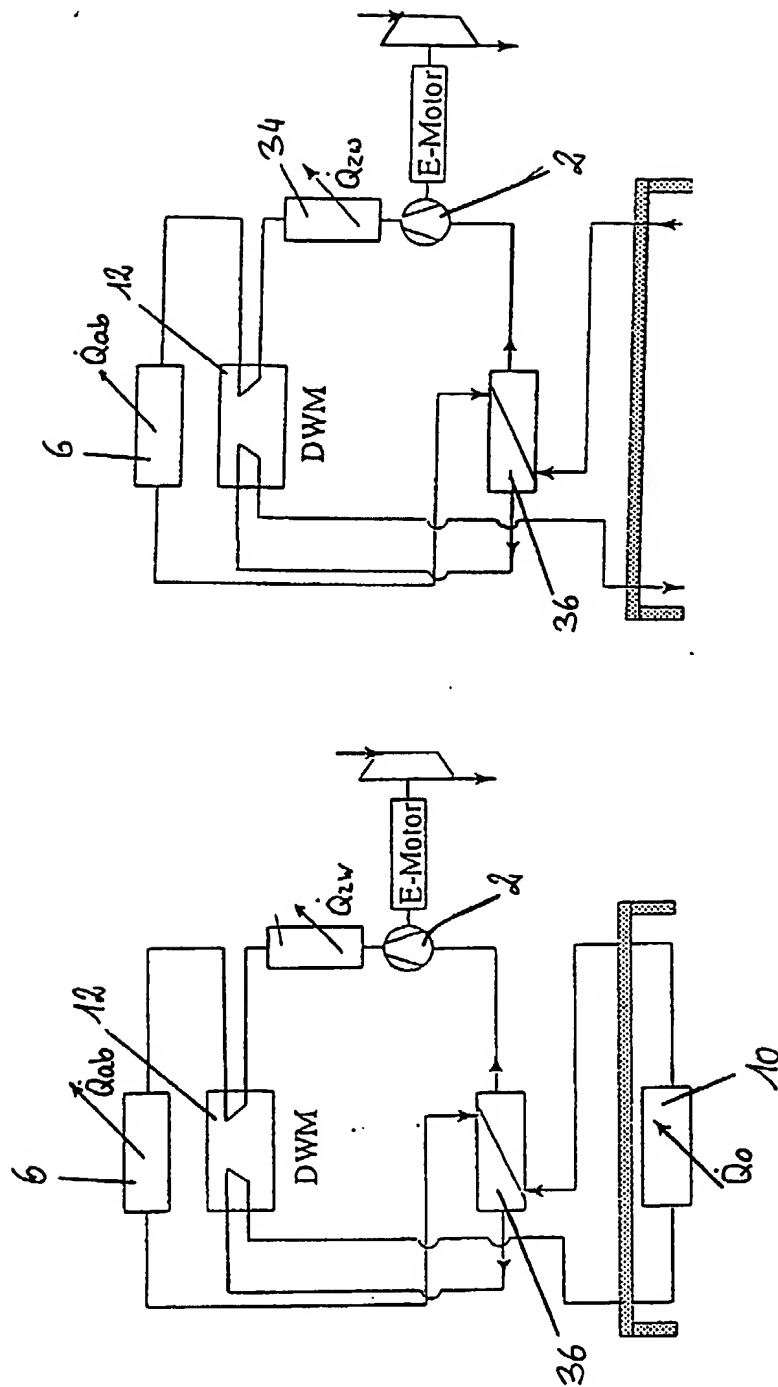


Fig. 9b

Fig. 9a

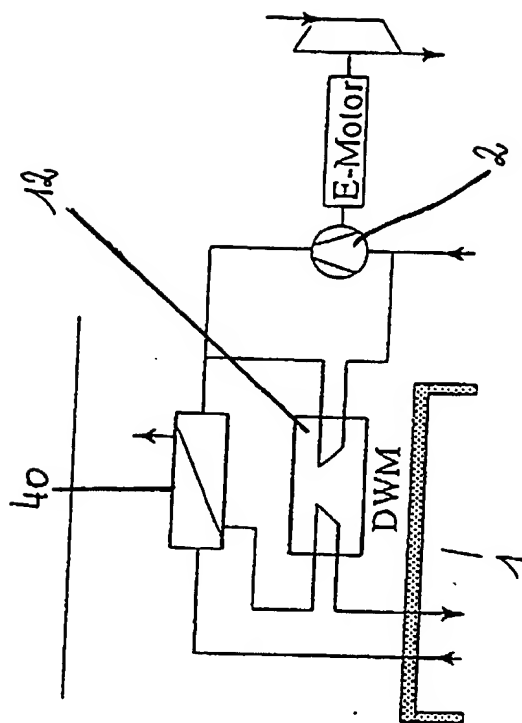


Fig. 10

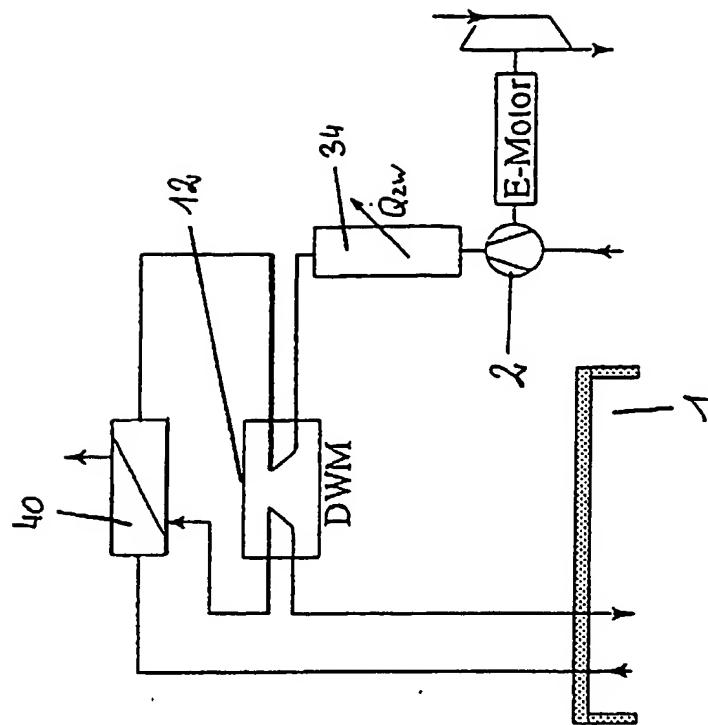


Fig. 11

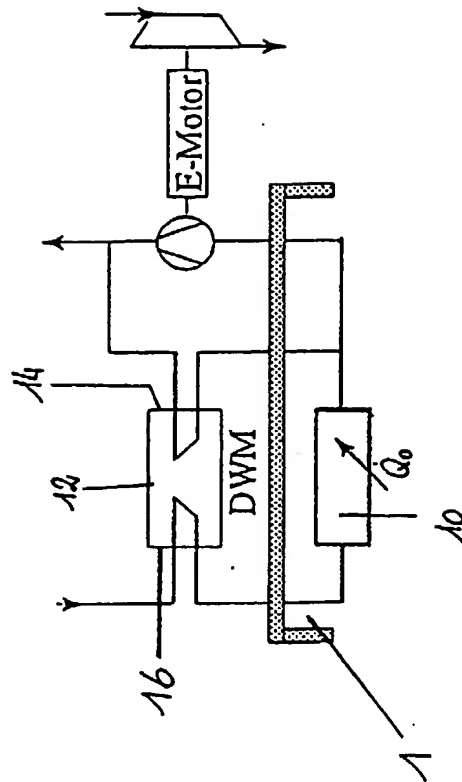


Fig. 12

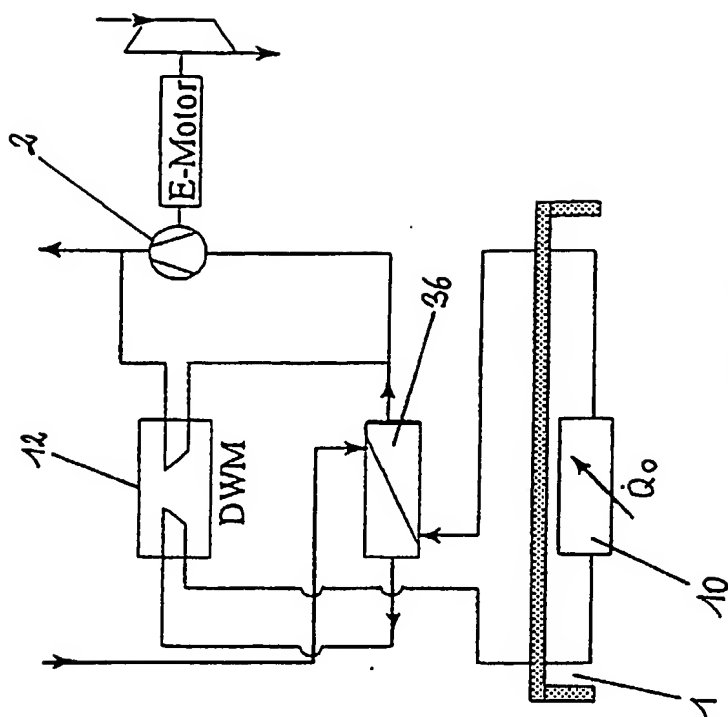


Fig. 13

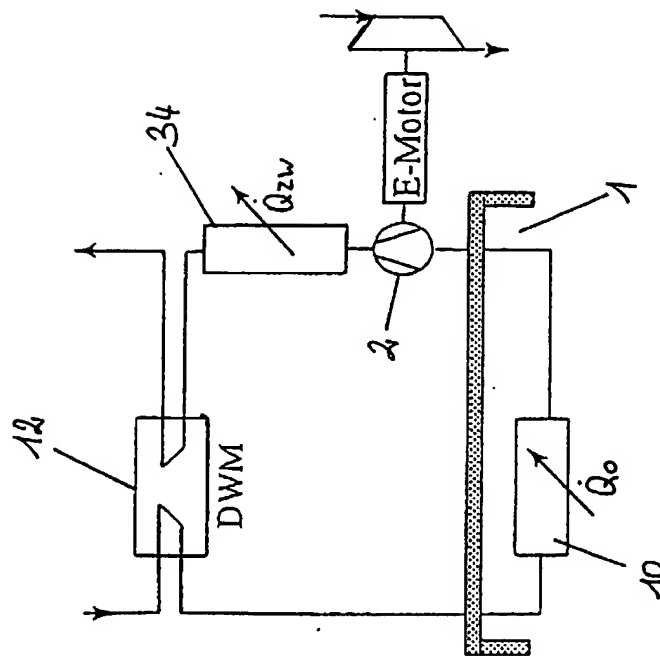


Fig. 14

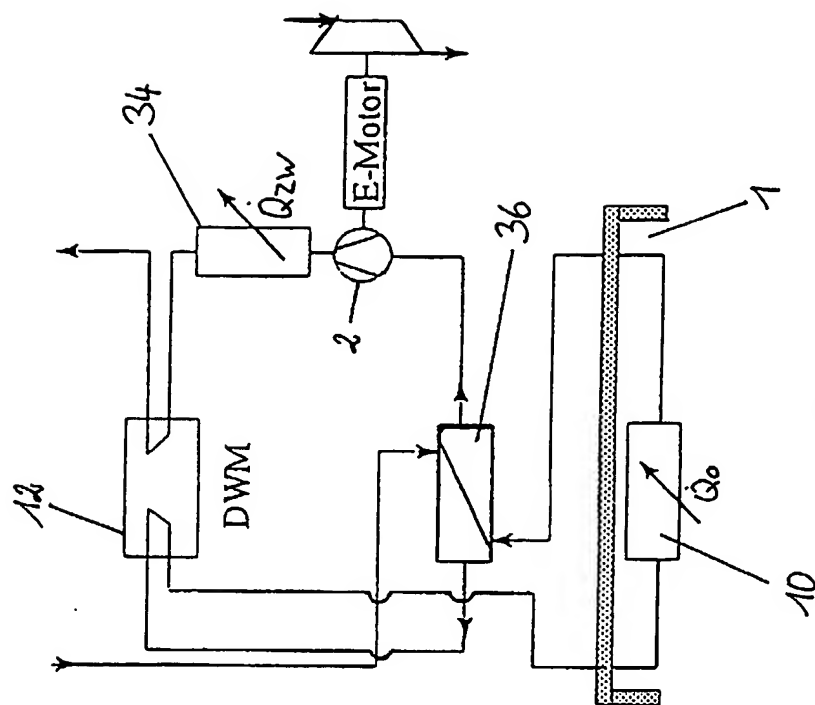


Fig. 15